

SF₆/N₂ 混合气体绝缘特性实验研究

贾程乾¹, 夏亚龙², 倪源¹, 谢施君², 张晨萌²

(1. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要:通过安托万方程和拉乌尔定律,研究了不同混合方案下 SF₆/N₂ 混合气体的液化温度,结合混合气体全球变暖潜能值(GWP)研究结果,分析混合气体的理化特性。文中搭建混合气体绝缘特性试验平台,测试不同混合方案下 SF₆/N₂ 混合气体的工频击穿电压和直流击穿电压,分析了混合气体中 SF₆ 含量对混合气体绝缘性能和理化性能的影响规律。研究表明,在气压为 0.5 MPa、SF₆ 含量为 30% 时,液化温度为 -59.8 °C,比纯 SF₆ 气体下降了 30 °C, GWP 下降了 31%,混合气体的绝缘性能基本达到相同压强下纯 SF₆ 的 80%,在一些严寒地区可替代纯 SF₆ 气体在气体绝缘输电线路(GIL)中使用。

关键词: SF₆/N₂ 混合气体;液化温度;GWP;绝缘特性

中图分类号: TM 855 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2022)02-0033-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20220207

Research on Insulation Characteristics of SF₆/N₂ Gas Mixture

JIA Chengqian¹, XIA Yalong², NI Yuan¹, XIE Shijun², ZHANG Chenmeng²

(1. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Based on Antoine equation and Raoult's law, the liquefaction temperature of SF₆/N₂ gas mixture under different mixing schemes is studied, and combined with the research results of global warming potential (GWP) of the gas mixture, its physical and chemical properties are analyzed. The power frequency breakdown voltage and DC breakdown voltage of SF₆/N₂ gas mixture under different mixing schemes are tested, and the influence of SF₆ content on the insulation performance and physicochemical properties of SF₆/N₂ gas mixture is analyzed. The results show that when the gas pressure is 0.5 MPa and SF₆ accounts for 30%, the liquefaction temperature is -59.8 °C, GWP decreases by 30%, and the insulation performance of the mixed gas reaches 80% of pure SF₆ under the same pressure. In some cold regions, it can replace pure SF₆ in gas insulated line (GIL).

Key words: SF₆/N₂ gas mixture; liquefaction temperature; global warming potential (GWP); insulation characteristics

0 引言

SF₆ 由于绝缘性能好、灭弧能力强、化学性质稳定等优点被广泛地应用于电气工业,如断路器、气体绝缘输电线路(gas insulated line, GIL)、气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated switchgear, GIS)、开关柜等^[1-3]。但 SF₆ 同时也是强温室效应气体,它的全球变暖潜能值(global warming potential, GWP)为 CO₂ 的 23 900 倍,即向大气中排放 1 kg 的 SF₆ 相当于排放了 23.9 t 的 CO₂,在 1997 年的《京都议定书》

中, SF₆ 被列为管制排放的气体^[4-7]。不仅如此, SF₆ 在电弧或大电场作用下会放电分解产生 F₂、SO₂ 等有毒有害气体,可能会产生不良的影响。随着“30·60”双碳目标的提出,中国应对气候变化的路径也进一步清晰化:二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,2060 年前实现碳中和。国家电网公司也积极响应号召寻找 SF₆ 替代气体,减少 SF₆ 的排放。

目前,研究人员还没有发现某种一元气体可以从绝缘、灭弧和环保等方面完全替代 SF₆,在这种情况下, SF₆ 混合气体就成为了比较理想的替代方案^[8-9]。SF₆ 混合气体的相关研究开始于 20 世纪 70

年代,比较常见的缓冲气体为 CO_2 、 N_2 等。在这些缓冲气体中, N_2 因其无毒、无污染、生产成本低等优势使得 SF_6 与 N_2 组成的混合气体拥有很好的应用前景。如果要在 GIL 与 GIS 中替代 SF_6 的使用,就必须研究替代气体的工频以及直流耐压特性,所以 SF_6/N_2 混合气体的工频和直流耐压特性就有很高的研究价值和意义。

下面在均匀场下,研究不同 SF_6 体积分数下 SF_6/N_2 混合气体的工频和直流耐压特性,分析了体积分数对混合气体绝缘性能的影响趋势,这对于 SF_6/N_2 混合气体在 GIL 等气体绝缘设备中的使用有重要的参考价值和实际工程意义。

1 SF_6/N_2 混合气体理化特性

1.1 液化温度

作为 SF_6 的潜在替代气体, SF_6/N_2 混合气体的液化温度是衡量其替代可行性的重要参考依据之一,尤其当利用 SF_6/N_2 混合气体制造的设备被应用于比较寒冷的地区时,混合气体由于低温液化将是电力设备面临的重大挑战之一^[10]。因此计算 SF_6/N_2 混合气体的液化温度数据对于工程实际应用具有重要的意义。下面计算了混合比为 20%、30%、40% 条件下的 SF_6/N_2 混合气体在 0.1~0.5 MPa 气压下的液化温度。使用的方法是安托万方程 (Antoine equation) 和拉乌尔定律相结合的方式^[11]。

首先,可以利用安托万方程写出 SF_6 与 N_2 的饱和蒸汽压与温度满足的方程关系为

$$\begin{cases} \lg p_1 = A_1 - \frac{B_1}{t + C_1} \\ \lg p_2 = A_2 - \frac{B_2}{t + C_2} \end{cases} \quad (1)$$

拉乌尔定律用方程可以表述为

$$\begin{cases} p_1 x = py \\ p_2 (1 - x) = p(1 - y) \end{cases} \quad (2)$$

将式(1)、式(2)联立化简后得

$$\frac{py}{10^{A_1 - B_1/(t+C_1)}} + \frac{p(1-y)}{10^{A_2 - B_2/(t+C_2)}} = 1 \quad (3)$$

式中: A_1 、 B_1 、 C_1 分别为组分 1 的特性常数; A_2 、 B_2 、 C_2 分别为组分 2 的特性常数; p_1 、 p_2 分别为组分 1 和组分 2 的饱和蒸汽压, p 为混合气体的饱和蒸汽压,mmHg(注:1 mmHg=133.32 Pa); y 为组分 1 所占气相的摩尔分数; x 为组分 2 所占气相的摩尔分数; t 为混合气体的液化温度。

应用时,将气压单位换算为 mmHg,代入式(3)即可求得该气压下的液化温度。 SF_6 与 N_2 的安托万方程如表 1 所示^[11]。

表 1 SF_6 、 N_2 的安托万方程常数

气体	A	B	C
SF_6	7.227	883.316	272.114
N_2	6.866	308.365	273.200

根据公式可以求得混合比为 20%、30%、40% 的 SF_6/N_2 混合气体在压强为 0.1~0.5 MPa 时的液化温度,如表 2 和图 1 所示。

表 2 不同压强和混合方案下 SF_6/N_2 混合气体液化温度
单位:℃

混合比	0.1 MPa	0.2 MPa	0.3 MPa	0.4 MPa	0.5 MPa
20%	-96.8	-85.6	-78.3	-72.8	-68.3
30%	-90.4	-78.4	-70.6	-64.7	-59.8
40%	-85.6	-72.9	-64.7	-58.4	-53.2
100%	-68.6	-53.5	-43.5	-35.9	-29.6

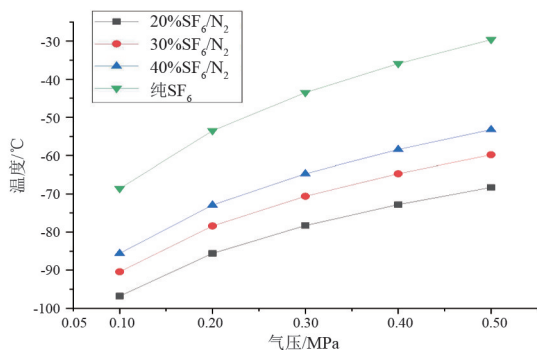


图 1 不同压强和混合方案下 SF_6/N_2 混合气体液化温度

1.2 全球变暖潜能值

除了液化温度之外,GWP 值同样也是关注的重要指标之一,它代表了混合气体的环保性能。根据 2006 年 5 月 17 日发布的欧洲议会和理事会法规 EC 842/2006《关于某些氟化温室气体》提到对混合气体的 GWP 值的计算方法^[12]:

$$G_z = x_1 \cdot G_1 + x_2 \cdot G_2 + \dots + x_n \cdot G_n \quad (4)$$

式中, x_1 、 x_2 、 \dots 、 x_n 为组分 1、2、 \dots 、 n 的质量分数; G_1 、 G_2 、 \dots 、 G_n 为组分 1、2、 \dots 、 n 的 GWP 值。

SF_6 的 GWP 值为 23 900, N_2 的 GWP 值为 0。将数据代入式(4)可以求得混合比为 20%、30%、40% 的 SF_6/N_2 混合气体的 GWP 值分别为 13 524、16 511、18 561,分别是纯 SF_6 气体的 56%、69%、78%。可以看出使用 SF_6/N_2 混合气体来替代纯 SF_6 气体可以显著减少对环境的影响。

2 实验平台与方法

根据实验需求搭建了 SF₆/N₂ 工频和直流绝缘实验平台,实验电路如图 2 所示。

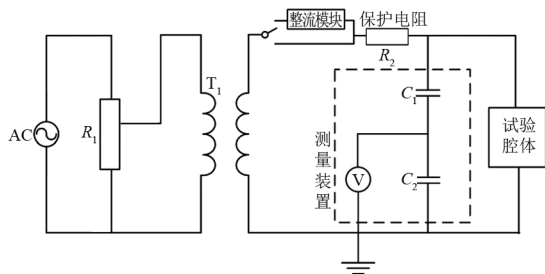


图 2 SF₆/N₂ 混合气体交直流实验平台电路

实验所用的交直流升压变压器内部装有用于整流的硅堆,可以通过一根控制棒对升压变压器产生的电压进行控制。将控制棒插入即可使硅堆短路,此时升压变压器产生工频交流电;将控制棒取出则硅堆开始正常工作,通过整流将产生的工频交流电整流成为直流电压。该升压变压器的低压为 200 V,高压为 100 kV,完全可以满足实验需求。

电极选用球-球电极来模拟均匀电场,球电极的半径为 25 mm。

实验时,先将腔体抽真空,再充入 SF₆、N₂ 气体。根据道尔顿分压定律可知,在同一容器中各组分气体的分压力就代表该组分气体在容器中的量^[13-14]。所以充入的 SF₆ 和 N₂ 压力之比应为混合比,为保证充入气体量的准确性,应先充入比例较小的气体,后充入比例较大的气体,充完气体之后静置 24 h 以保证气体混合均匀。加压时先快速增加到预估击穿电压的 70%,然后以每秒 3% 的预估击穿电压的速率上升直至试品被击穿。记录此时的击穿电压,重复 20 次求平均值,每次实验间隔 5 min 以保证混合气体完全恢复绝缘强度。直流实验方式与工频类似。

3 实验结果与分析

SF₆/N₂ 混合气体工频绝缘实验结果如表 3 所示,折线图如图 3 所示。

可以看出随着混合气体中 SF₆ 比例增加,混合气体的绝缘能力在上升,在 SF₆ 占 20% 时,混合气体的绝缘能力在 0.1~0.5 MPa 分别达到了纯 SF₆ 的

62.6%~73.9%;继续增加 SF₆ 的含量至 SF₆ 达到混合气体的 30% 时,混合气体的绝缘能力在 0.1~0.5 MPa 分别达到了纯 SF₆ 的 82.0%~85.0% 当 SF₆ 气体在;混合气体中的比例达到 40%,此时混合气体的绝缘能力在 0.1~0.5 MPa 时分别达到了纯 SF₆ 的 88.5%~92.4%。可以看出,在提高 SF₆ 在混合气体中比例时,气体绝缘能力的提升出现了比较明显的饱和现象,在比例达到 30% 之前,提升 SF₆ 含量对于混合气体的绝缘能力有比较好的提升,在达到 30% 之后继续提升可以看出气体的绝缘能力虽然在增加,但增加的效果变得不如之前明显,而且在 SF₆ 比例达到 30% 以后,混合气体的绝缘强度已经达到了纯 SF₆ 气体的 80% 左右。综合考虑混合气体的绝缘强度和成本以及环保性能等,取混合气体中 SF₆ 比例为 30% 是比较好的选择。

表 3 不同压强和混合比下 SF₆/N₂ 混合气体

混合比	工频击穿电压有效值					单位:kV
	0.1 MPa	0.2 MPa	0.3 MPa	0.4 MPa	0.5 MPa	
100%	15.50	29.59	42.19	54.77	65.45	
20%	9.70	19.43	29.76	40.44	48.38	
30%	12.72	24.24	35.90	46.37	54.25	
40%	14.59	26.36	38.55	49.81	58.05	

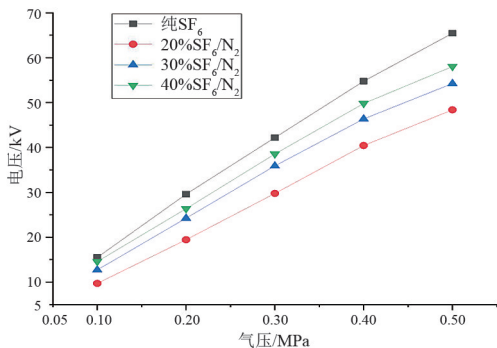


图 3 不同压强和混合方案下工频 SF₆/N₂ 混合气体击穿电压有效值

SF₆/N₂ 混合气体直流负极性绝缘实验结果如表 4 所示,折线图如图 4 所示。

表 4 不同压强和混合比下 SF₆/N₂ 混合气体

混合比	直流负极性击穿电压					单位:kV
	0.1 MPa	0.2 MPa	0.3 MPa	0.4 MPa	0.5 MPa	
100%	-23.0	-37.1	-52.8	-68.4	-82.7	
20%	-14.3	-25.4	-36.1	-49.7	-56.4	
30%	-17.9	-30.3	-42.1	-55.2	-68.3	
40%	-19.1	-32.8	-44.3	-58.1	-71.3	

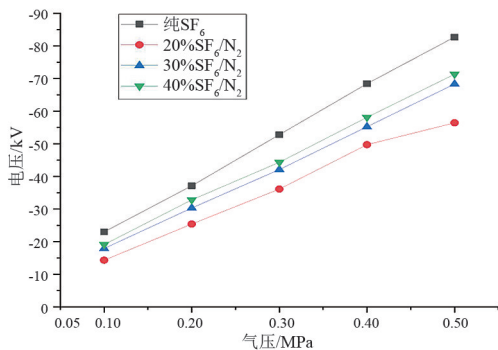


图4 不同压强和混合比下 SF₆/N₂ 混合气体直流负极性击穿电压

可以看出与工频绝缘特性类似,随着混合气体中 SF₆ 比例增加,混合气体的绝缘能力在上升,在 SF₆ 占 20%时,混合气体的绝缘能力在 0.1~0.5 MPa 分别达到了纯 SF₆ 的 62.2%~72.3%;继续增加 SF₆ 的含量至 30%时,混合气体的绝缘能力在 0.1~0.5 MPa 分别达到了纯 SF₆ 的 77.8%~82.6%;当 SF₆ 气体含量达到 40%,此时混合气体的绝缘能力在 0.1~0.5 MPa 时分别达到了纯 SF₆ 的 83%~88.4%。可以看出,与工频绝缘特性类似,在提高 SF₆ 比例时,气体绝缘能力的提升出现了比较明显的饱和现象,在 30%之前,提升 SF₆ 含量对于混合气体的绝缘能力有比较好的提升,在达到 30%之后继续提升可以看出气体的绝缘能力虽然在增加,但增加的效果变得不如之前明显。而且在 SF₆ 比例达到 30%以后,混合气体的绝缘强度已经达到了纯 SF₆ 气体的 80%左右。综合考虑混合气体的绝缘强度和成本以及环保性能等,取混合气体中 SF₆ 比例为 30%是比较好的选择。

将纯 SF₆ 气体与混合比为 30%的 SF₆/N₂ 混合气体的工频击穿电压幅值与直流负极性击穿电压进行对比,如图 5 所示。可以看出,直流负极性电压下气体的绝缘能力比工频电压下气体的绝缘能力要

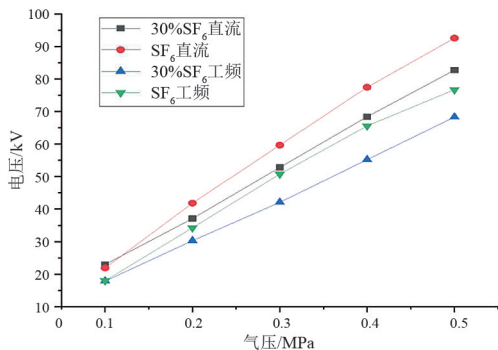


图5 纯 SF₆ 与 SF₆/N₂ 混合气体工频幅值与直流负极性击穿电压对比

强。这是由于在工频电压条件下,气体间隙一般在更容易击穿的半周内击穿。在所搭建的实验条件下,气隙更容易在交流电压的正半周击穿,负半周的耐压能力更强,所以直流负极性的击穿电压会高于工频击穿电压的幅值。

4 结论

前面通过实验对不同混合比下的 SF₆/N₂ 混合气体的工频绝缘特性和直流负极性绝缘特性进行了测定,通过控制变量法对比分析了在不同混合比、不同外加电压情况下混合气体的绝缘特性,得到了如下结论:

1) 工频耐压试验与直流负极性耐压试验中,混合气体的击穿电压都随混合比的增加而增加,但混合比增加到 30%左右时击穿电压增加的速度开始减缓,此时混合气体的绝缘能力大约为纯 SF₆ 气体的 80%。

2) 在其他条件相同的球-球电极条件下, SF₆/N₂ 混合气体的直流负极性绝缘特性强于工频绝缘特性。

3) SF₆/N₂ 混合气体具有良好的绝缘性能,在部分应用场合具有替代 SF₆ 气体的潜力;混合比为 30%,气压为 0.5 MPa,混合气体的液化温度为 -59.8 °C, GWP 值相较于纯 SF₆ 气体下降了 31%,绝缘能力可以达到纯 SF₆ 的 80%左右,可以在一些严寒地区的 GIL 中替代纯 SF₆ 气体的使用。

参考文献

- [1] 侯志强,郭若琛,李军浩.直流电压下 SF₆/N₂ 混合气体沿面局部放电特性[J].电工技术学报,2020,35(14):3087-3096.
- [2] 朱娟,沈梦甜,余霞,等.SF₆/N₂ 混合气体的工频击穿特性研究[J].湖南电力,2019,39(6):20-22.
- [3] 钟建英,王志刚,张博,等.热态 SF₆/N₂ 混合气体击穿特性研究[J].高压电器,2020,56(7):8-14.
- [4] 李兴文,赵虎.SF₆ 替代气体的研究进展综述[J].高压技术,2016,42(6):1695-1701.
- [5] 周文俊,郑宇,杨帅,等.替代 SF₆ 的环保型绝缘气体研究进展与趋势[J].高压电器,2016,52(12):8-14.
- [6] 白玮,贺永明,王刚,等.SF₆/N₂ 混合气体 GIS 隔离接地开关绝缘及压力承受水平的设计分析[J].绝缘材料,2020,53(5):97-100.
- [7] 赵国涛,钱国明,王盛.“双碳”目标下绿色电力低碳发展的路径分析[J].华电技术,2021,43(6):11-20.

- [8] 程诗敏.SF₆/N₂混合气体介质条件下 GIL 内绝缘特性研究[D].武汉:武汉理工大学,2018.
- [9] 孙鹏程,王帮田,洪文芳,等.SF₆/N₂混合气体绝缘特性的实验研究[J].中国电力,2012,45(12):71-75.
- [10] 覃兆宇,郑宇,卫李静,等.低温下 SF₆/N₂混合气体的雷电冲击绝缘特性[J].高电压技术,2017,43(12):3907-3913.
- [11] 李鸿鹏,丰驰尧,李宝锋,等.SF₆混合气体的液化特性研究[J].电气技术,2020,21(11):57-60.
- [12] 张震,林莘,余伟成,等.C₄F₇N/CO₂和 C₄F₇N/N₂混合气体热力学物性参数计算[J].高电压技术,2020,46(1):250-256.
- [13] 唐念,姜旭,黎晓淀,等.均匀电场中 SF₆及其替代气体雷电冲击特性实验研究[J].高压电器,2021,57(3):6-10.
- [14] 李丽,郭泽,邹磊磊,等.SF₆替代气体的饱和蒸汽压特性研究[J].西安交通大学学报,2019,53(3):157-163.

作者简介:

贾程乾(1997),男,硕士研究生,主要研究方向为高压与绝缘技术。
(收稿日期:2021-09-30)

(上接第6页)

- [13] 谭雅倩,周学志,徐玉杰,等.海水抽水蓄能技术发展现状及应用前景[J].储能科学与技术,2017,6(1):35-42.
- [14] Wikipedia. Pumped-Storage Hydroelectricity [EB/OL]. (2016-04-16) [2021-09-14]. https://en.wikipedia.org/wiki/Pumped-storage_hydroelectricity.
- [15] 林铭山.抽水蓄能发展与技术应用综述[J].水电与抽水蓄能,2018,4(1):1-4.
- [16] 王楠.中国抽水蓄能电站发展现状与前景分析[J].电力技术经济,2008,20(2):18-20.
- [17] 国内单机容量最大抽蓄电站定子吊装并下闸蓄水[J].云南电力技术,2021,49(4):39.
- [18] 世界最大在建抽水蓄能电站复工[J].中国产经,2020(3):64.
- [19] 费万堂,衣传宝,杨梅,等.河北丰宁抽水蓄能电站交流励磁变速机组工程设计与认识[J].水电与抽水蓄能,2020,6(4):12-18.
- [20] 李偲,郗文康,张德隆,等.柔性直流系统中变速抽蓄机组与风电的协调控制策略研究[J].天津理工大学学报,2020,36(4):16-21.
- [21] 陈超,刘海滨,葛景,等.双馈变速抽蓄机组参与平抑风电功率波动研究[J].发电技术,2020,41(4):452-460.
- [22] Minxiao Han, Girmaw Teshager Bitew, Sifrash Amogne Mekonnen, et al. Wind Power Fluctuation Compensation by Variable Speed Pumped Storage Plants in Grid Integrated System: Frequency spectrum analysis[J].CSEE Journal of Power and Energy Systems,2021,7(2):381-395.
- [23] 吴秋芳,林文婧,陈志伟,等.海岛抽水蓄能电站枢纽布置研究——以大万山岛为例[J].广东水利水电,2020(8):61-67.
- [24] 贺儒飞,王方,张豪.海水可变速抽水蓄能机组技术路线及关键参数选择[J].水利水电技术,2020,51(增刊2):184-189.
- [25] 张韬,高彦明.可变速抽水蓄能机组水泵水轮机能量特性及效益优势浅析[J].水电与抽水蓄能,2020,6(4):32-35.
- [26] 刘宇,王建刚,乔照威,等.海水抽水蓄能变速发电电动机设计与计算[J].大电机技术,2021(2):13-18.
- [27] 史华勃,王渝红,滕予非,等.全功率变速抽水蓄能机组快速功率模式小信号建模[J].电力系统自动化,2022,46(4):162-169.
- [28] 韩晓言,丁理杰,陈刚,等.梯级水光蓄互补联合发电关键技术与研究展望[J].电工技术学报,2020,35(13):2711-2722.
- [29] 周修宁,江军.基于改进 NSGA-II 算法的水-光-蓄发电系统多目标规划方法[J].四川电力技术,2021,44(2):8-15.
- [30] 李涛,胡维昊,陈刚,等.多场景下梯级水-光-蓄容量配置与优化运行研究[J].四川电力技术,2021,44(2):1-7.
- [31] 衣传宝,杨梅,梁廷婷,等.全功率变频抽水蓄能机组技术应用浅析[J].水电与抽水蓄能,2020,6(5):56-61.
- [32] 畅欣.FSC可变速抽水蓄能机组功率调节特性研究[D].北京:华北电力大学,2016.
- [33] 周鸿汉.四川省第一座抽水蓄能电站——寸塘口抽水蓄能电站简介[J].水电站设计,1992(4):81-82.

作者简介:

陈刚(1985),男,博士,高级工程师,研究方向为电力系统分析与控制;

丁理杰(1981),男,博士,正高级工程师,研究方向为大电网安全稳定分析与控制;

韩晓言(1965),男,博士,正高级工程师,从事电力系统稳定与控制工作。

(收稿日期:2021-09-16)